

La relation glaciers (calottes) - climat

On l'étudie à deux niveaux :

- glaciers = éléments du syst. Climatique
- glaciers = témoins des variations climatiques

1/ glaciers éléments du système climatique → la taille !

- **Grosses calottes** :

- Circulations générales (atmosphérique et océanique)
- Albédo
- niveau des mer (rétroaction sur le syst. Climatique)
- circulations propres (katabatiques)

- **Glaciers de montagne** (effets a priori similaires mais bcp moins impactants (albédo, système de brises locales..))

2/ glaciers témoins du système climatique

-**Archivage glaciaire** :

-**Calottes** OK

- pas de fusion + écoulement sympa –continuité du signal
- faible taux d'accu → remonter loin dans le temps
(Col du Dôme 125m = 250 ans ; DC 3000m = 900 000 ans !)

-**Glaciers de montagne** (exceptionnel)

- fusion estivale → percolation et lessivage
- Ecoulement complexe (confinement, rôle du relief)
- Taux d'accu importants

Exception : sites de haute altitude si possible dômes ou cols..

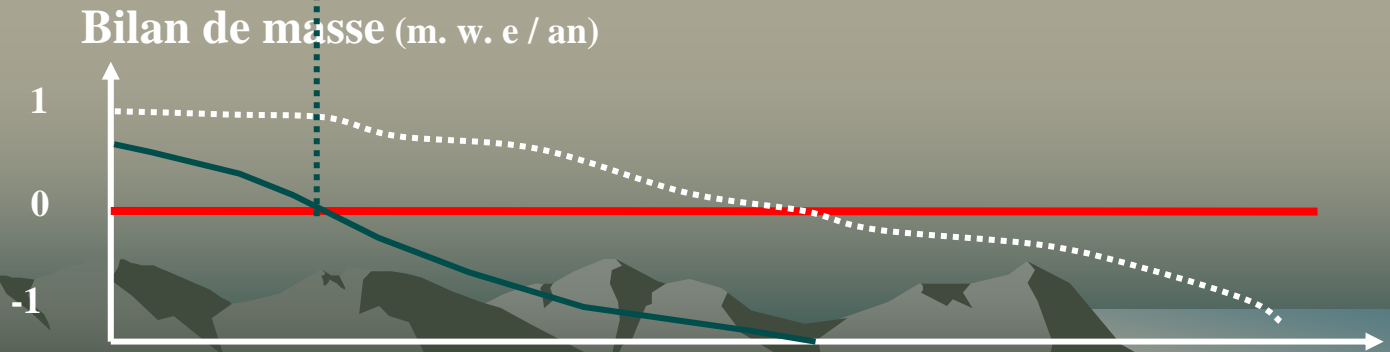
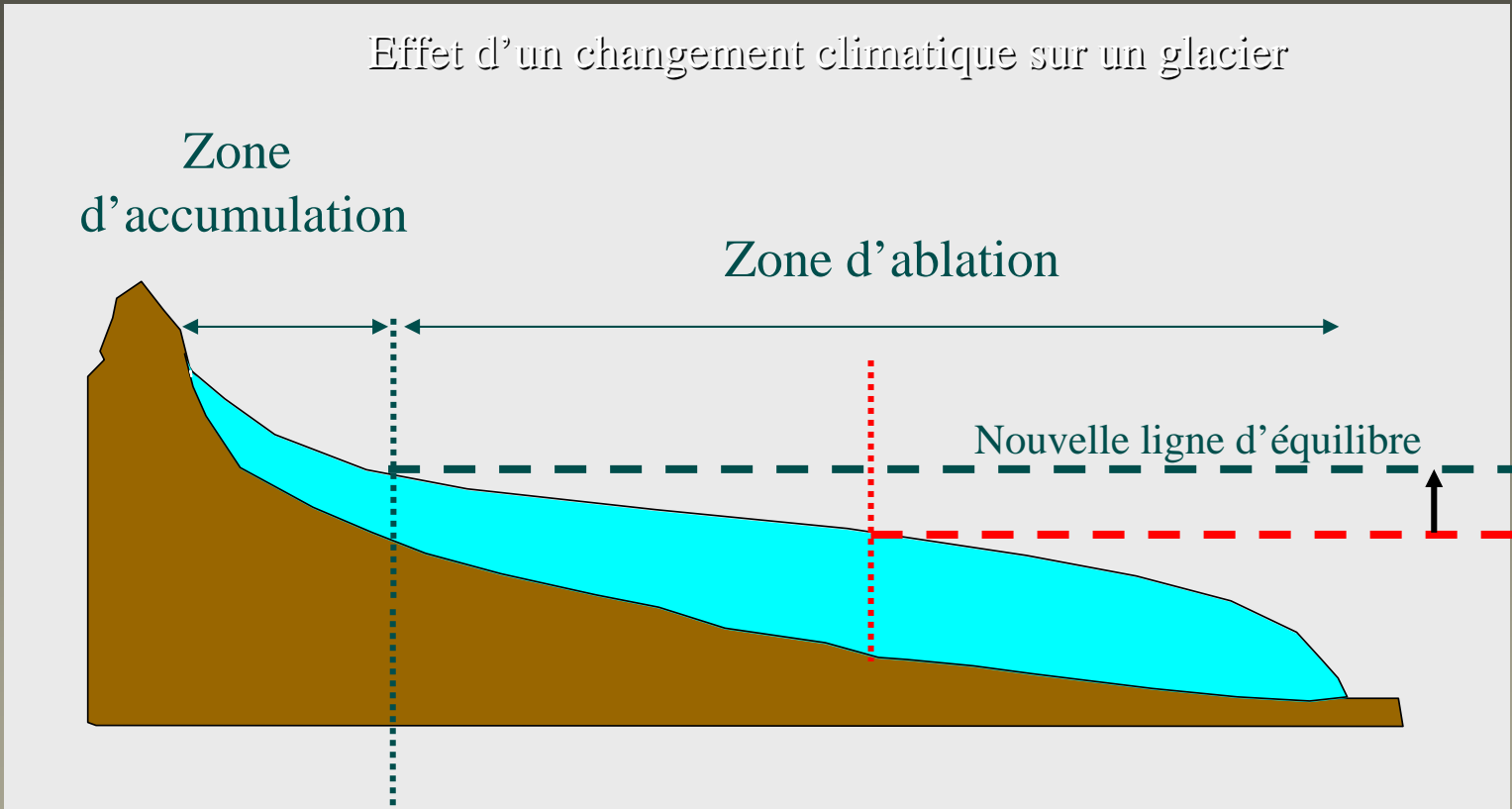
-Fluctuations glaciaires en réponse au climat

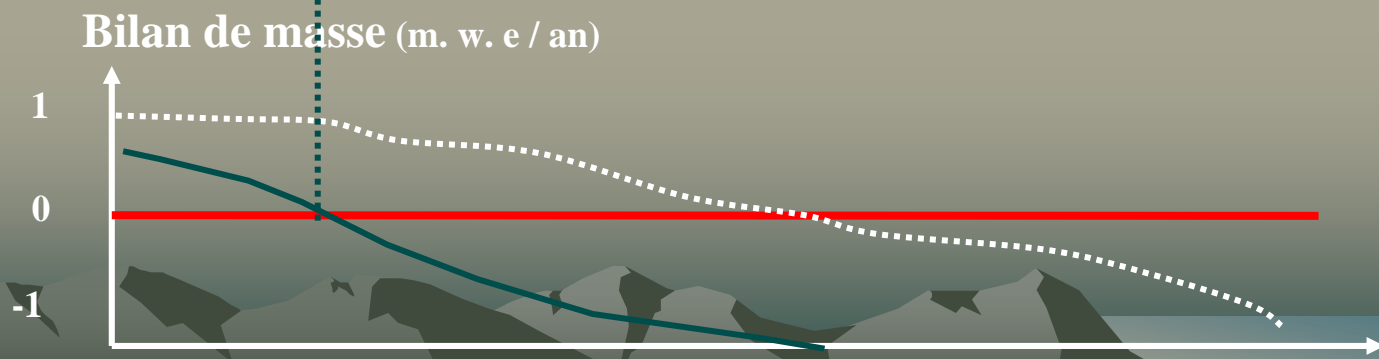
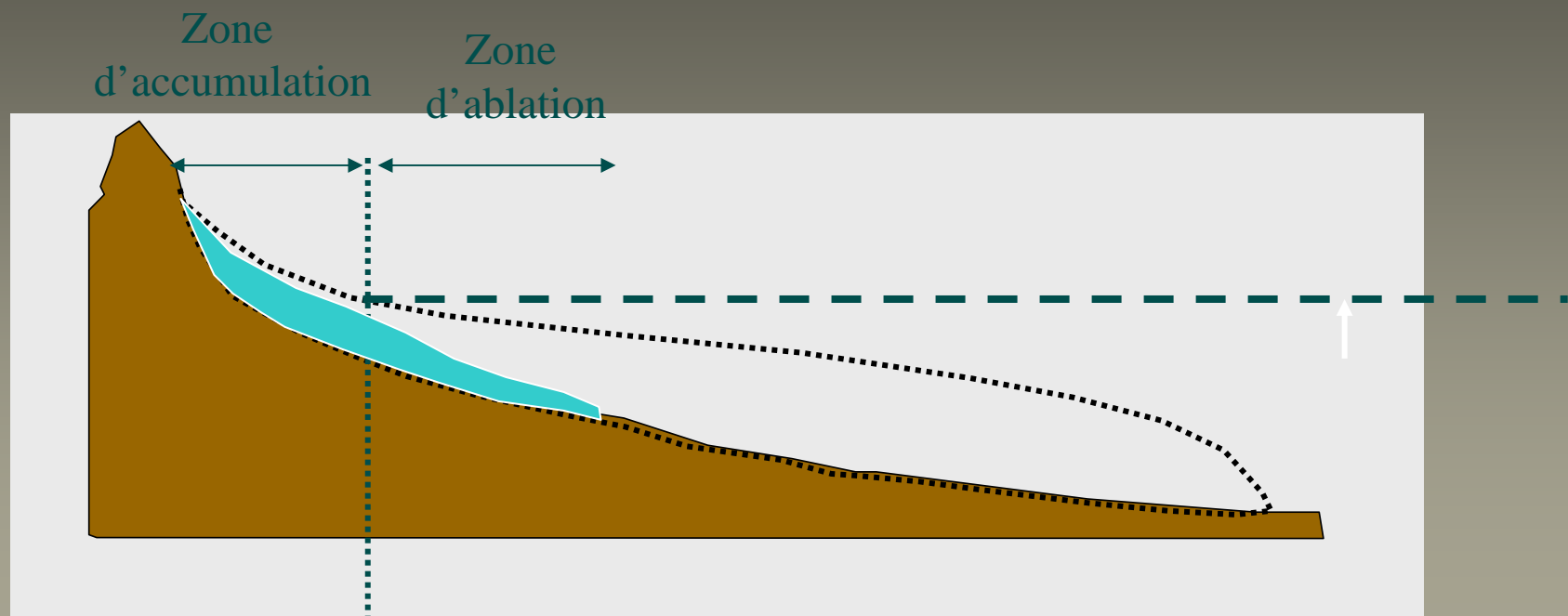
- **via le bilan de masse**

Calottes et glaciers OK

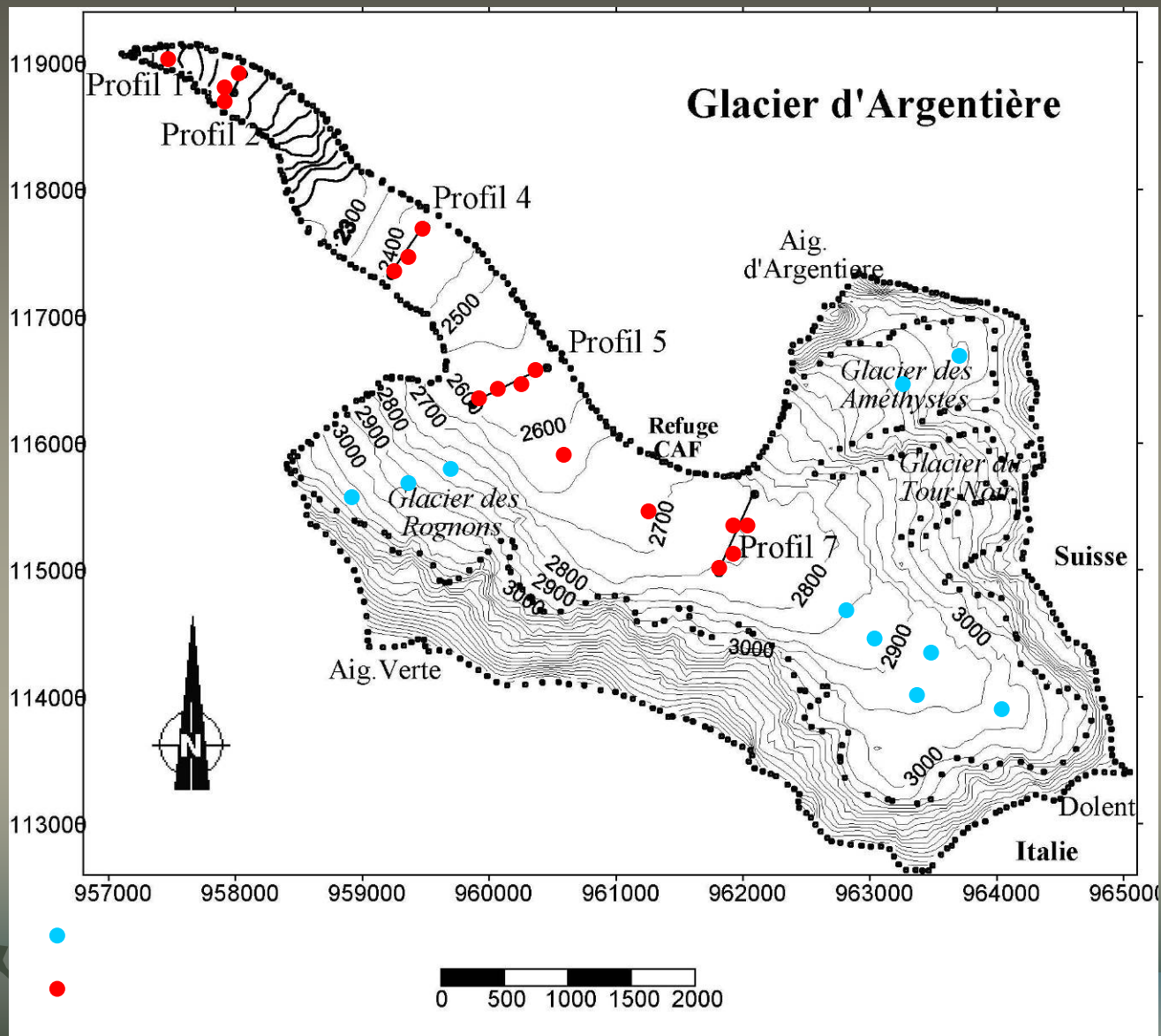
- **via les fluctuations géométriques**

- **Calottes** → bôf (temps de réponse longs !)
- **Glaciers** ok (réponse rapide quoique complexe)





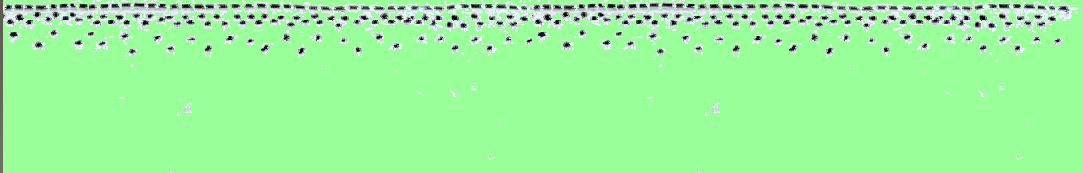
Sites de mesures sur le glacier d'Argentière



Mesure du bilan de masse annuel dans la zone d'accumulation

Fin été n

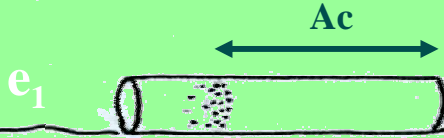
Surface fin été n



Surface Mai n+1

Accumulation
hivernale A_c

Fin été n



Mai n+1

Surface fin été n

Fin été n

Mai n+1

Carottage jusqu'à la couche de fin d'été précédent

Implantation d'une balise et mesure de son émergence e_1

Fin été n+1

Mesure de la nouvelle émergence e_2

$$\text{Bilan} = A_c - A_b$$

Calcul du bilan spécifique sur l'ensemble du glacier

Bilan volumique (m³ d'eau) :

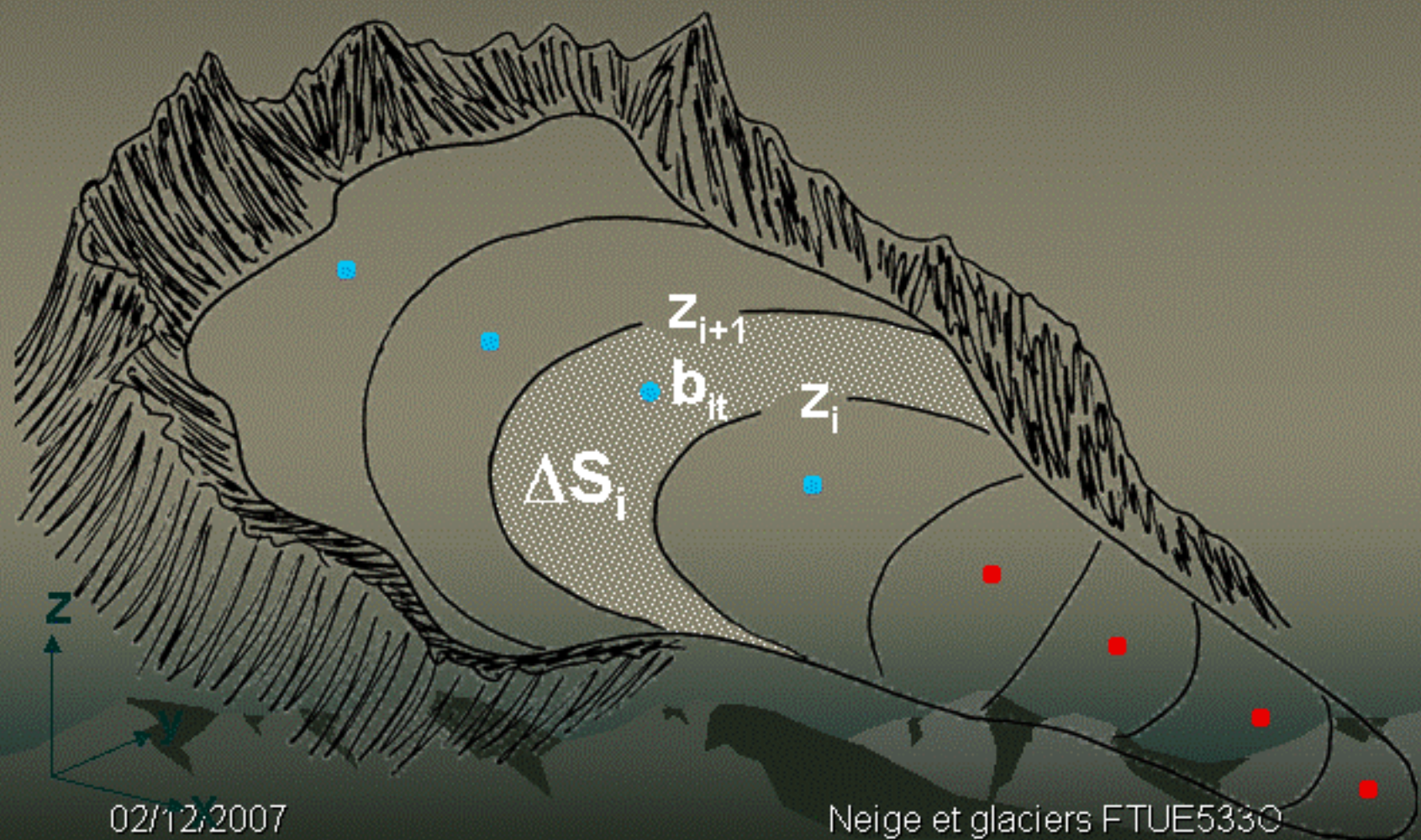
$$B_t = \sum_{i=1}^N \Delta S_i b_{it}$$

bilan

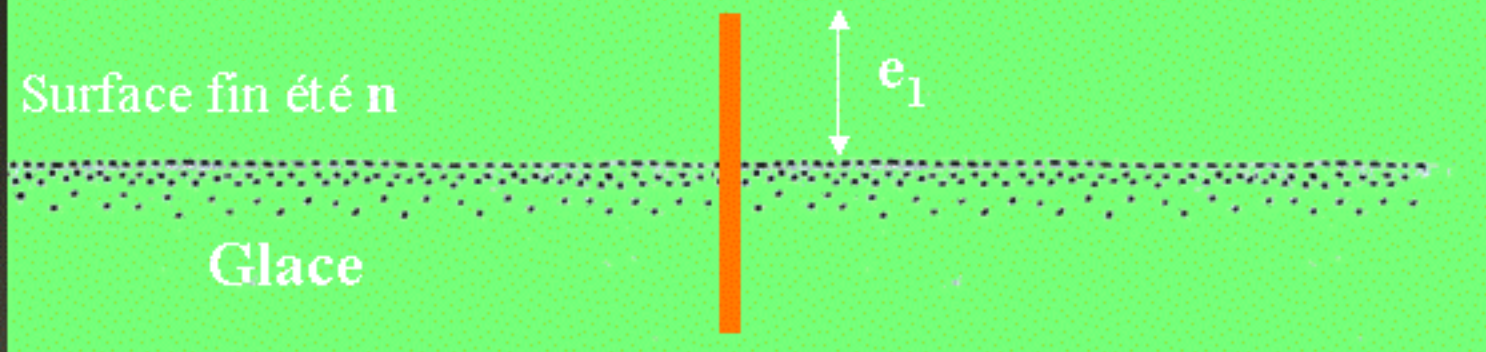
Bilan spécifique (m d'eau):

$$b_t = \frac{B_t}{S}$$

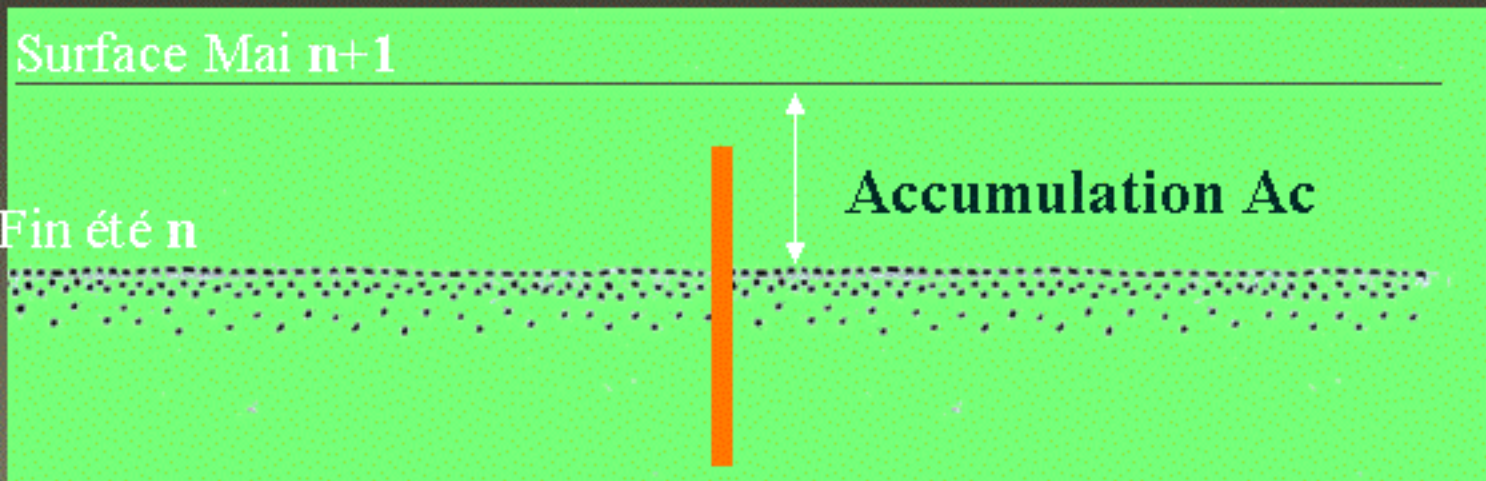
Surface totale du glacier



$\Delta S_1 \dots \Delta S_i \dots$:
hypsographie
du glacier

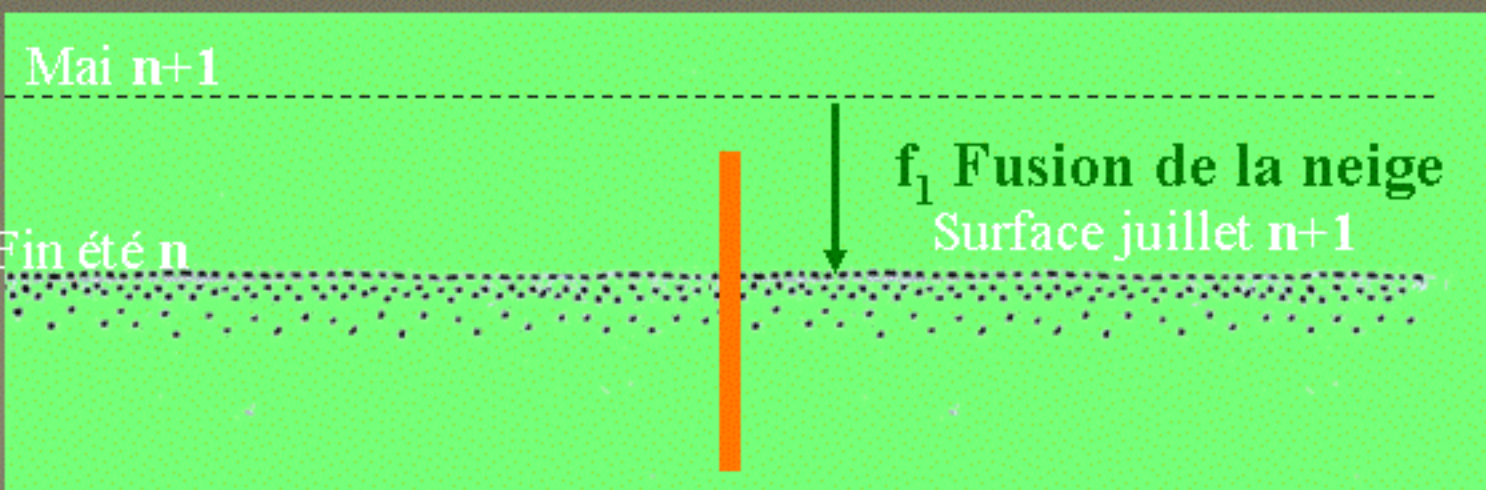


Implantation d'une balise d'ablation et mesure de son émergence



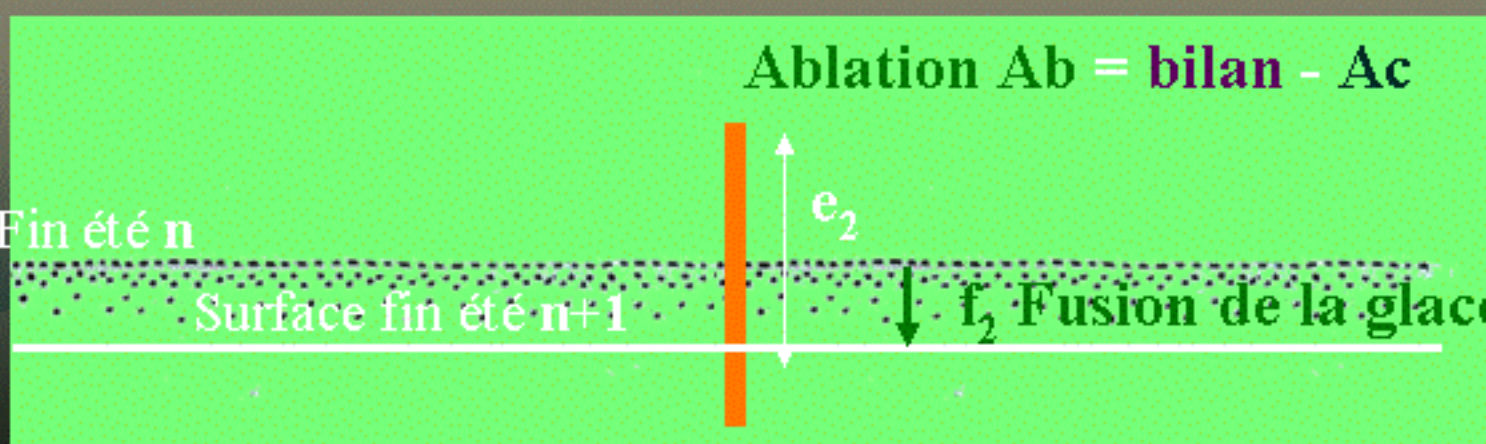
Mai n+1

Mesure du manteau nival à son maximum (carottage ou Sonde). La balise ne sert pas



Juillet n+1

A un moment de l'été, toute la la neige de l'hiver a fondu (f_1). La surface correspond alors à celle de la fin de l'été précédent



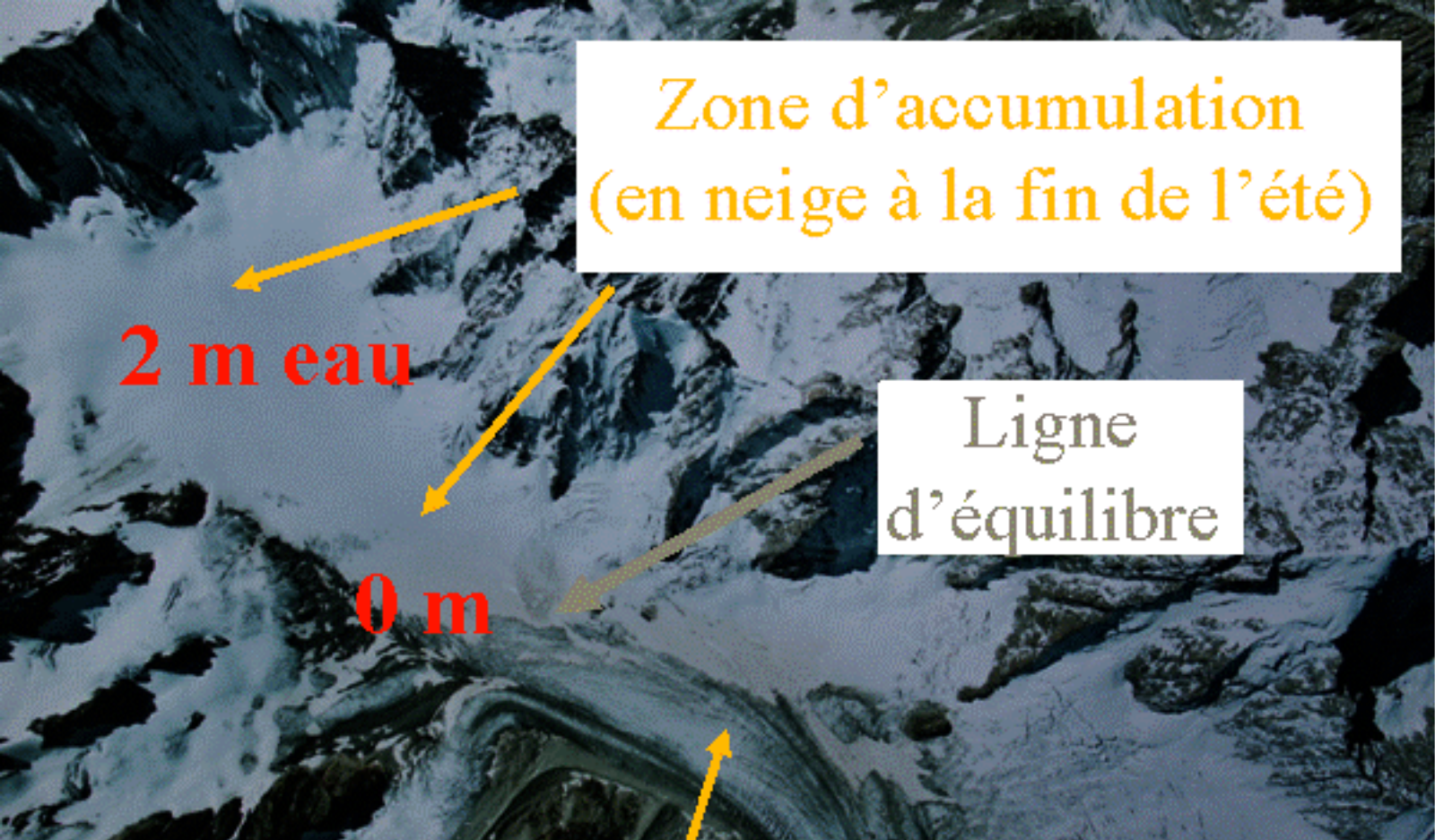
Fin été n+1

Baisse de surface par fonte de glace (f_2) La nouvelle émergence e_2 est lue et par soustraction de e_1 donne le bilan annuel.

L'ablation est déduite par différence entre le bilan et l'accumulation mesurés

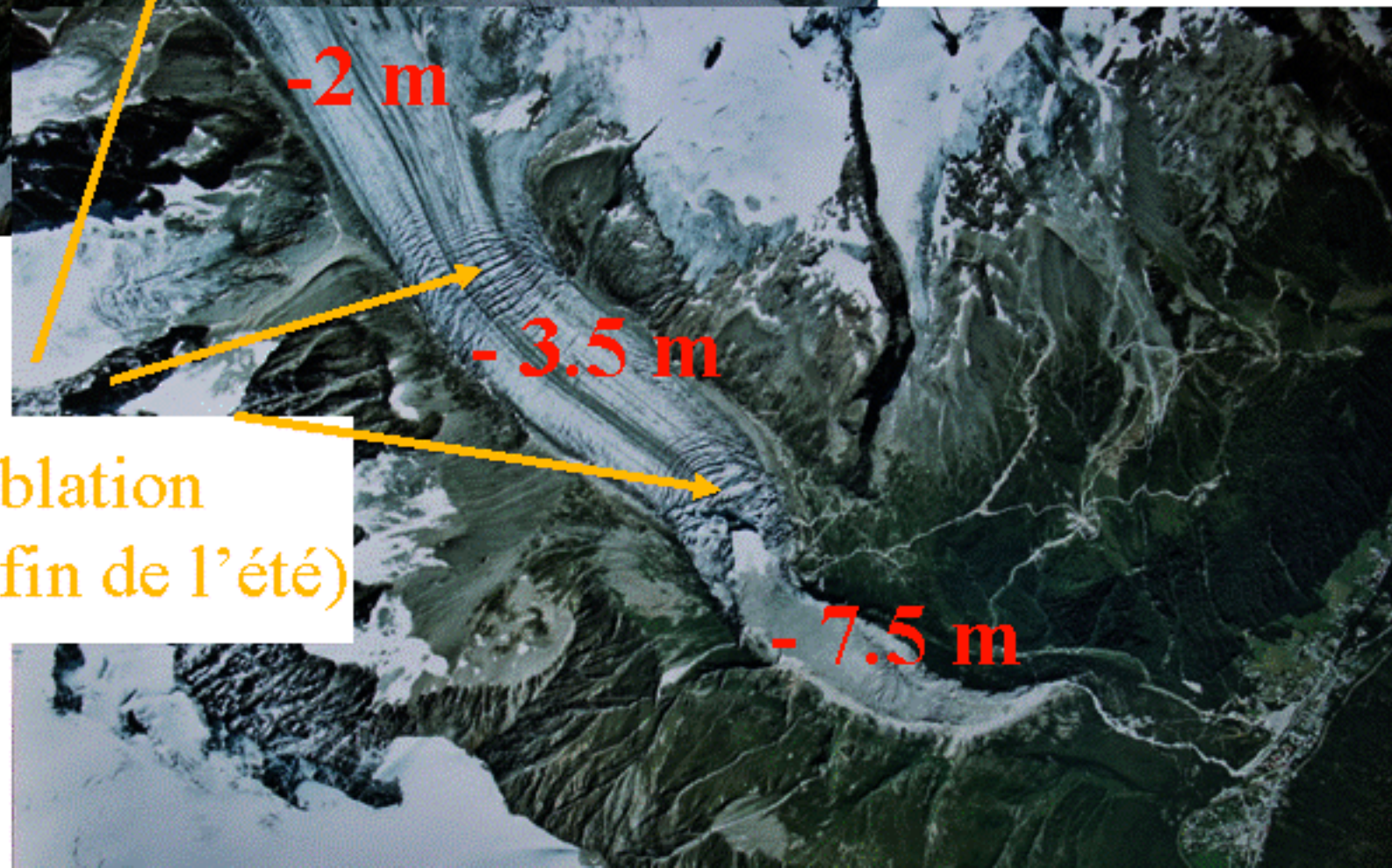


02/12/2007

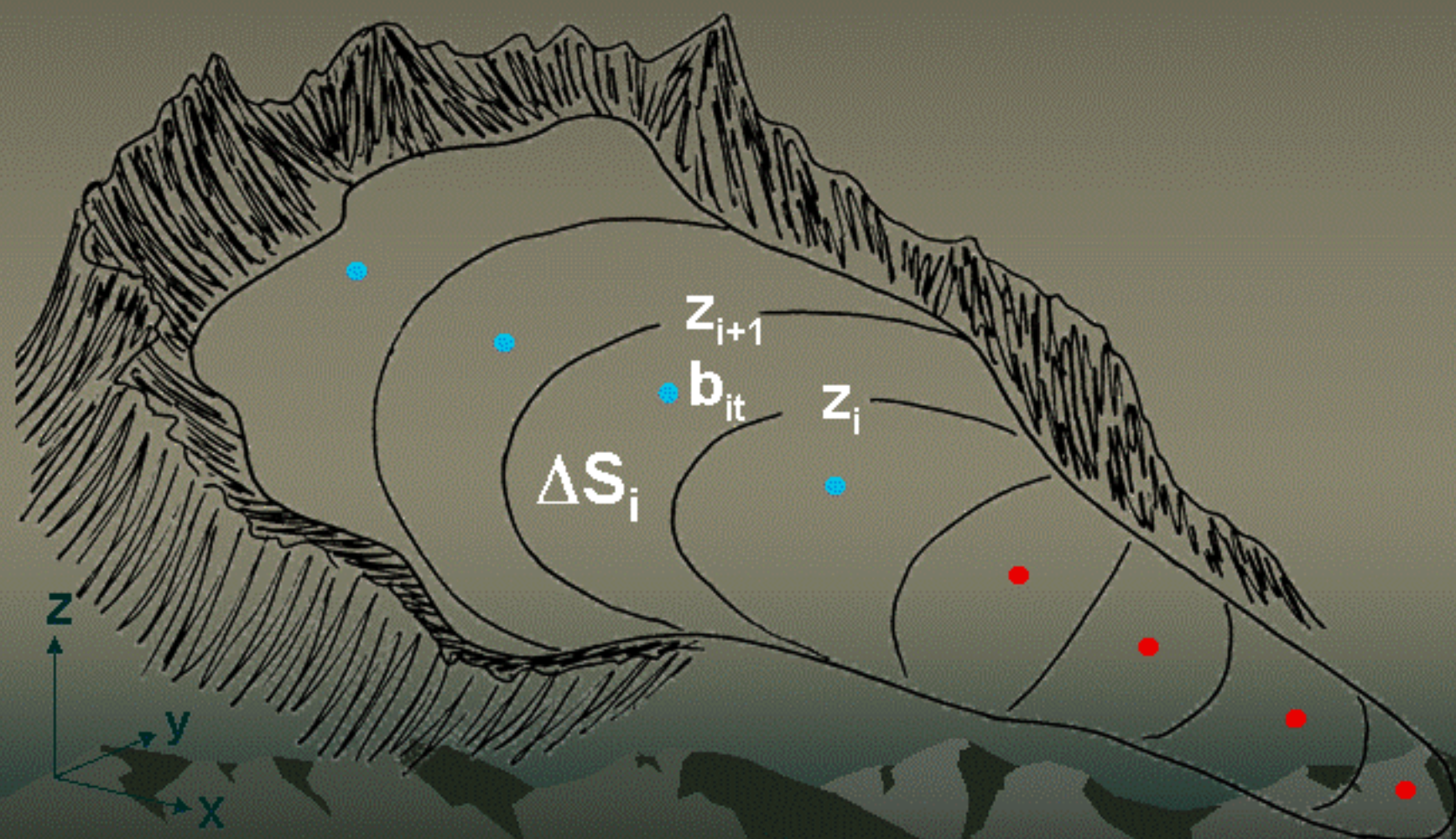


Exemple pour le glacier d'Argentière

Mesures de bilan de masse annuel par le Laboratoire de glaciologie



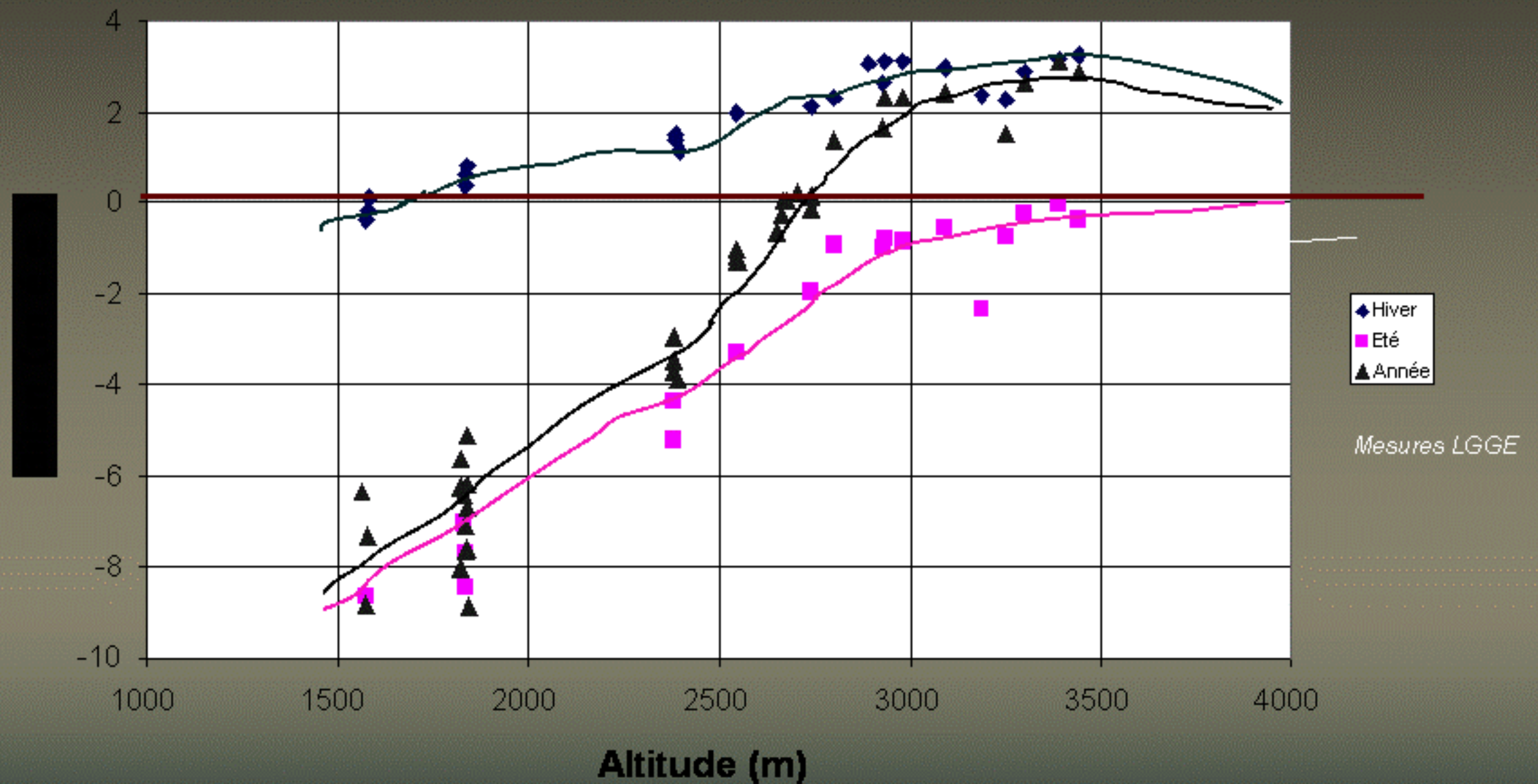
Hypsométrie du glacier : découpage en bandes d'altitude



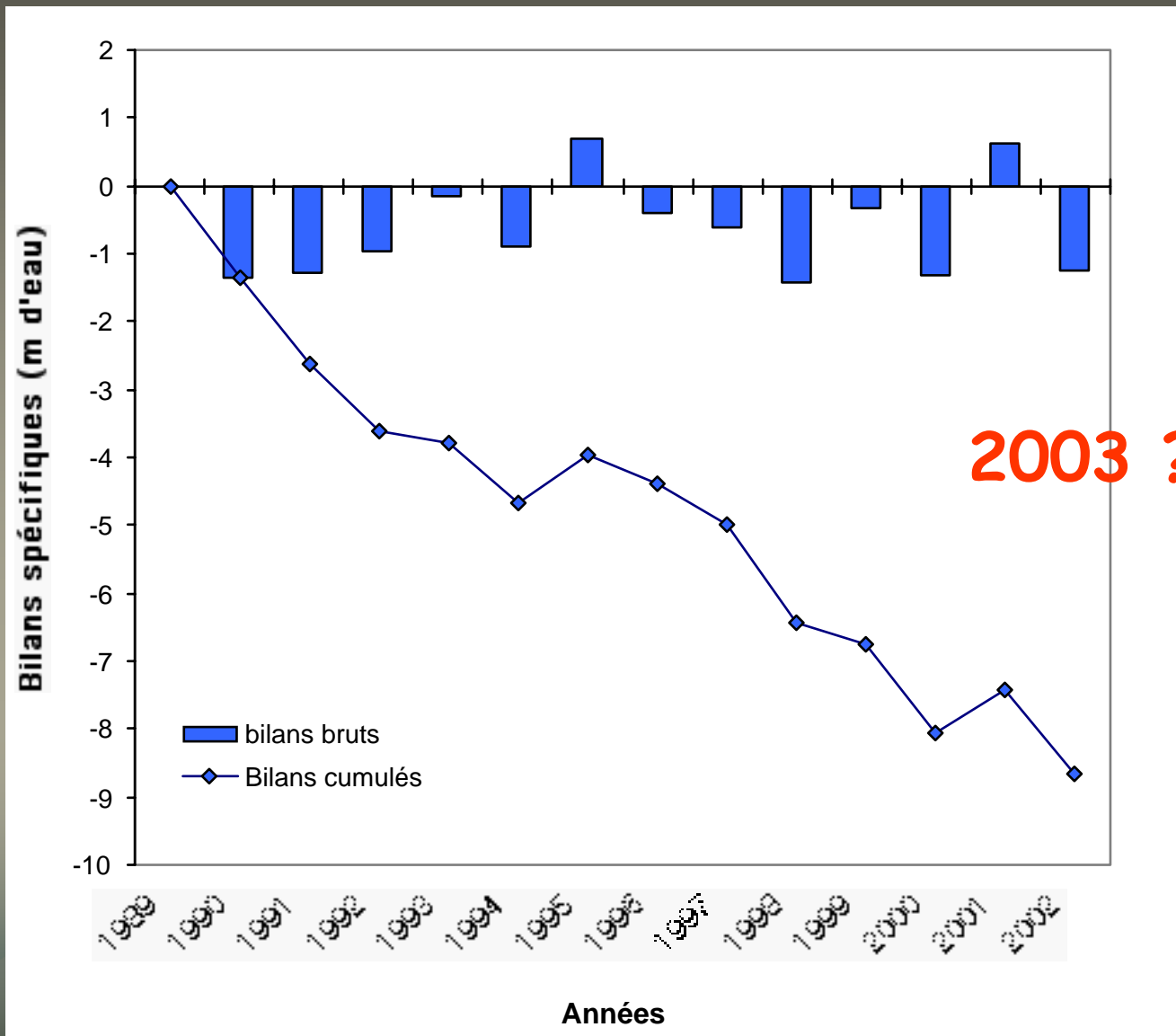
$\Delta S_1 \dots \Delta S_i \dots$:
hypsographie
du glacier :
surface de
tranche d'altitude

Bilan glaciaire

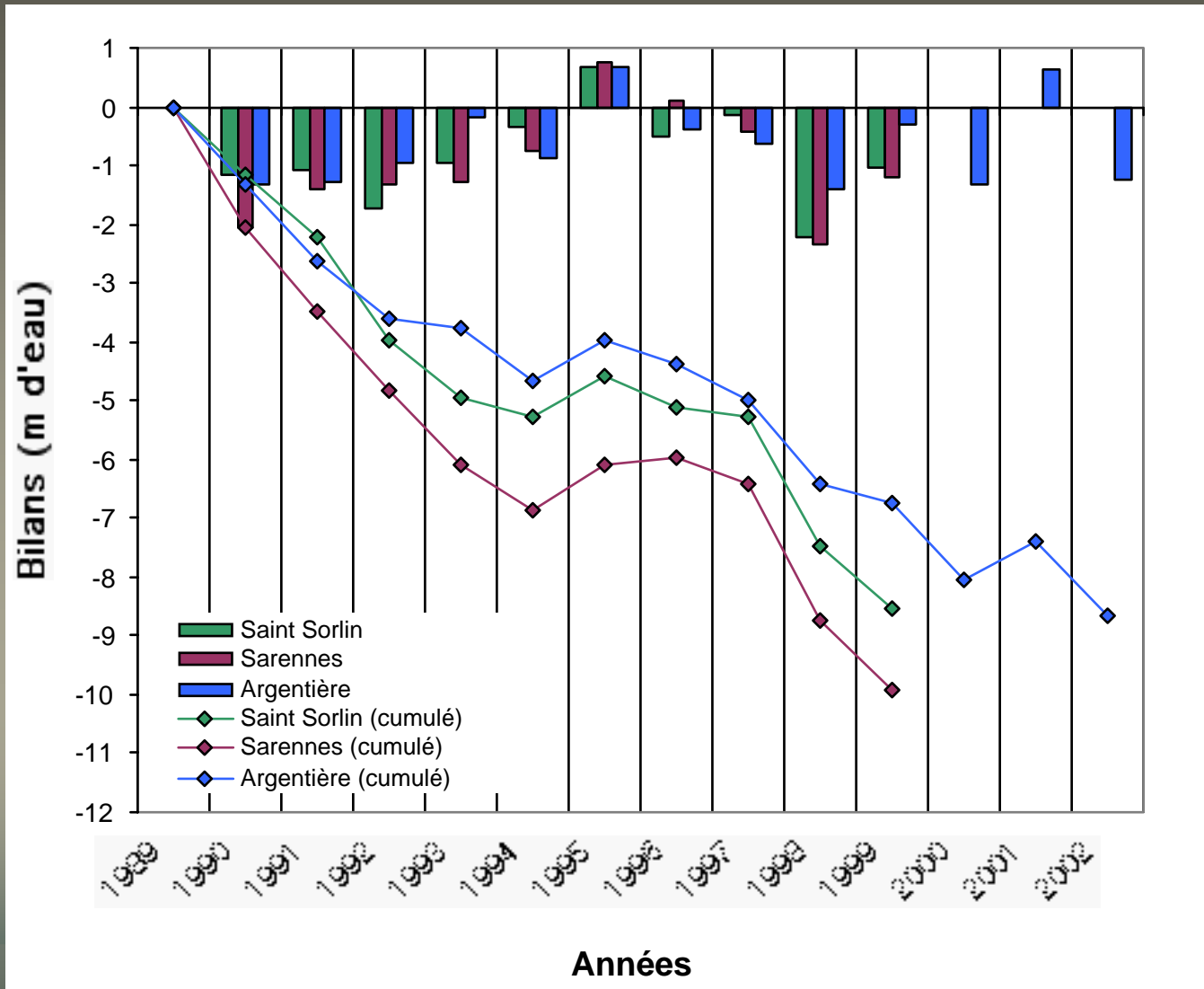
Glacier d'Argentière 2000-2001

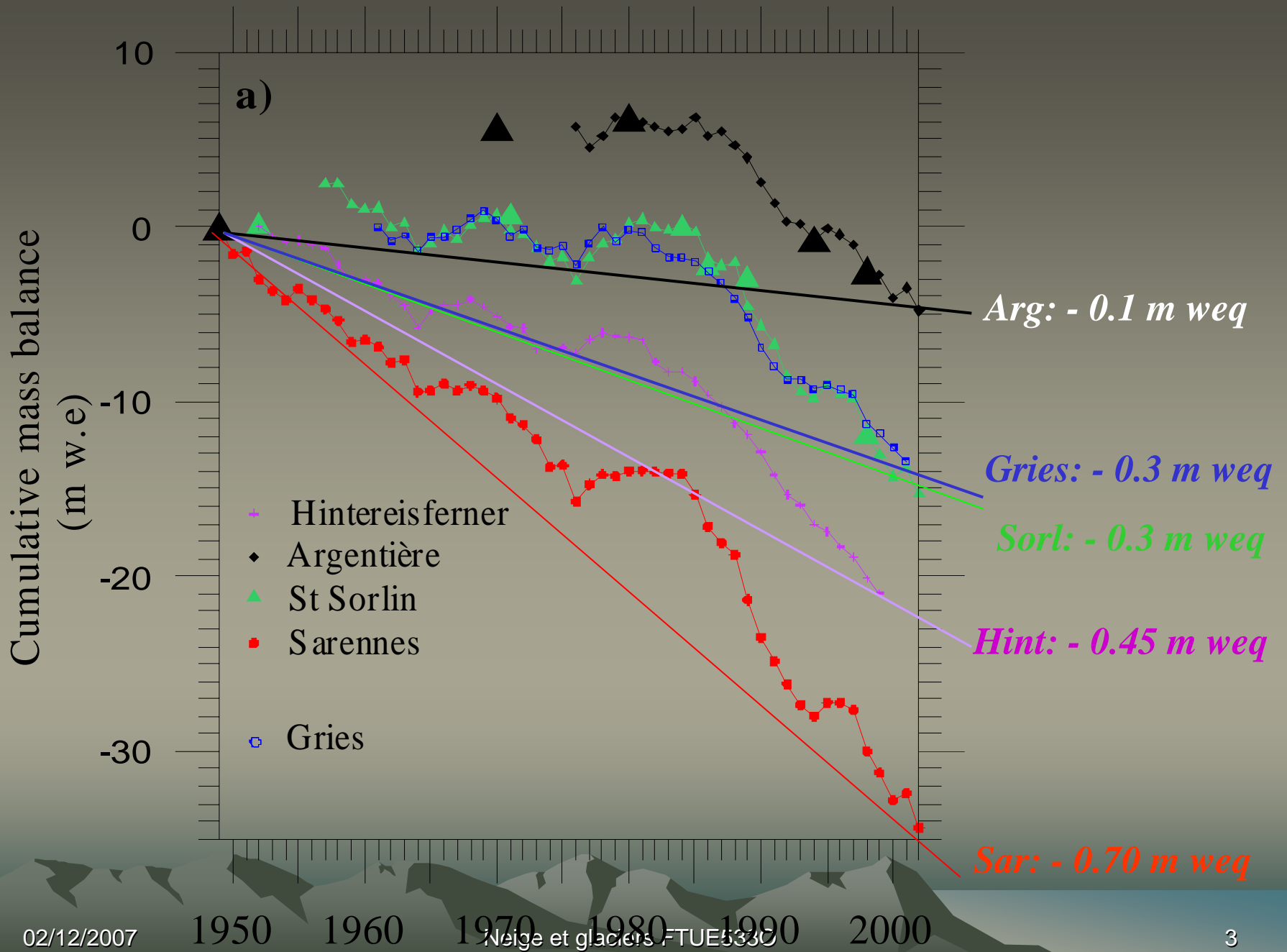


Évolution du bilan : glacier d'Argentière



Évolution du bilan : 3 glaciers des Alpes françaises

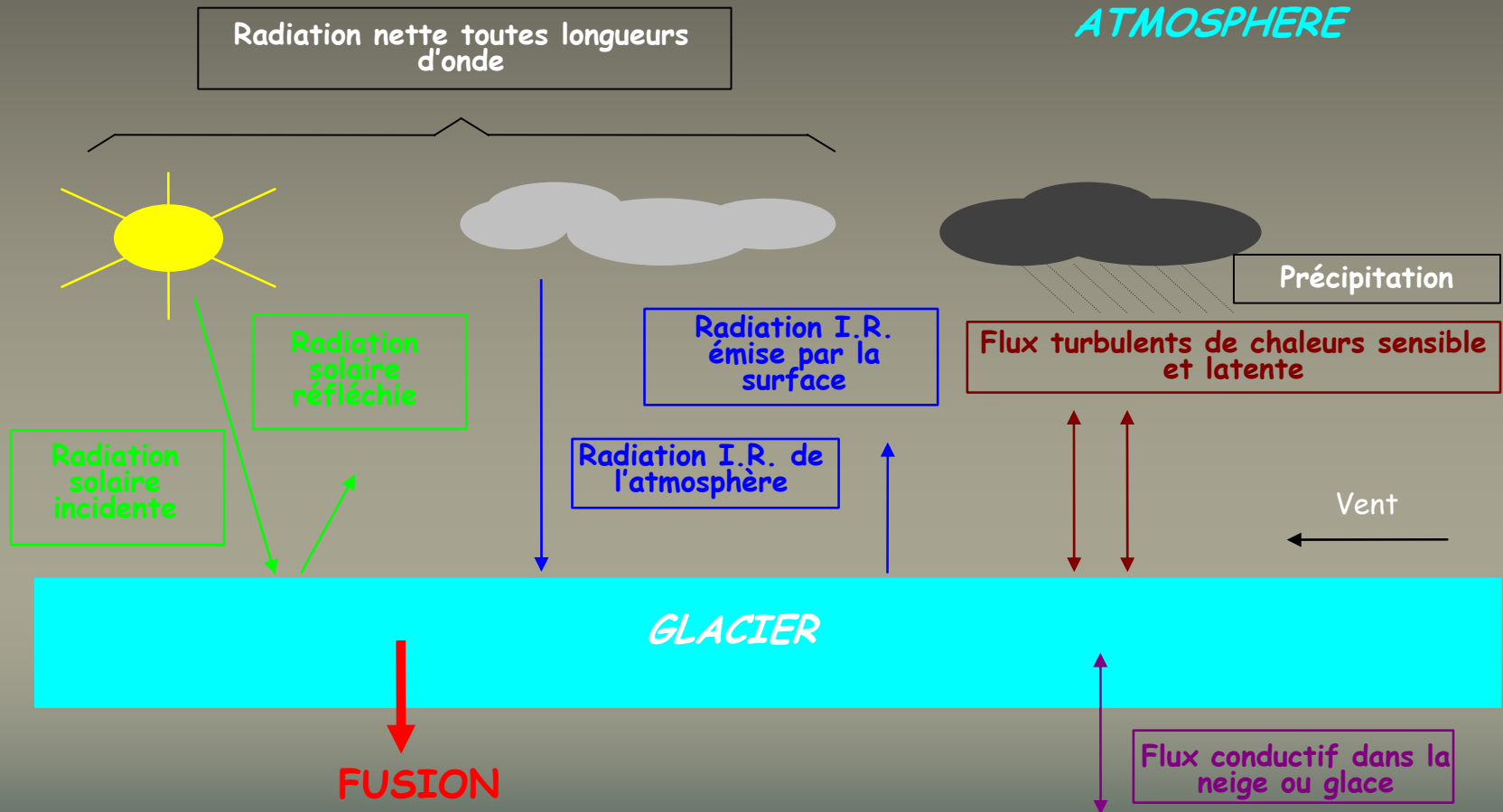




Calcul du bilan énergétique

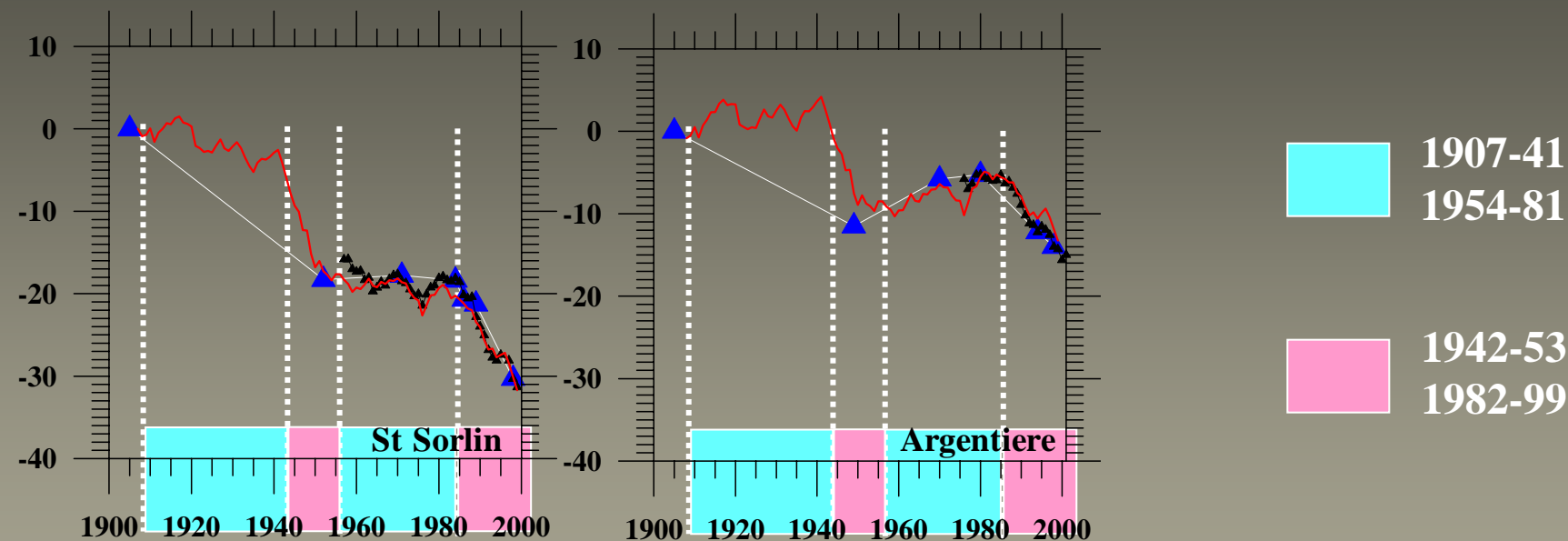
Fusion en un point donnée par :

$$R + H + LE + G + P = \Delta Q_M$$



LA RELATION BILAN DE MASSE / CLIMAT

Bilans nets cumulés (m. eau)



* Bilan hivernal = f (précipitation)

* Bilan estival = f (flux d'énergie)

Ablation M

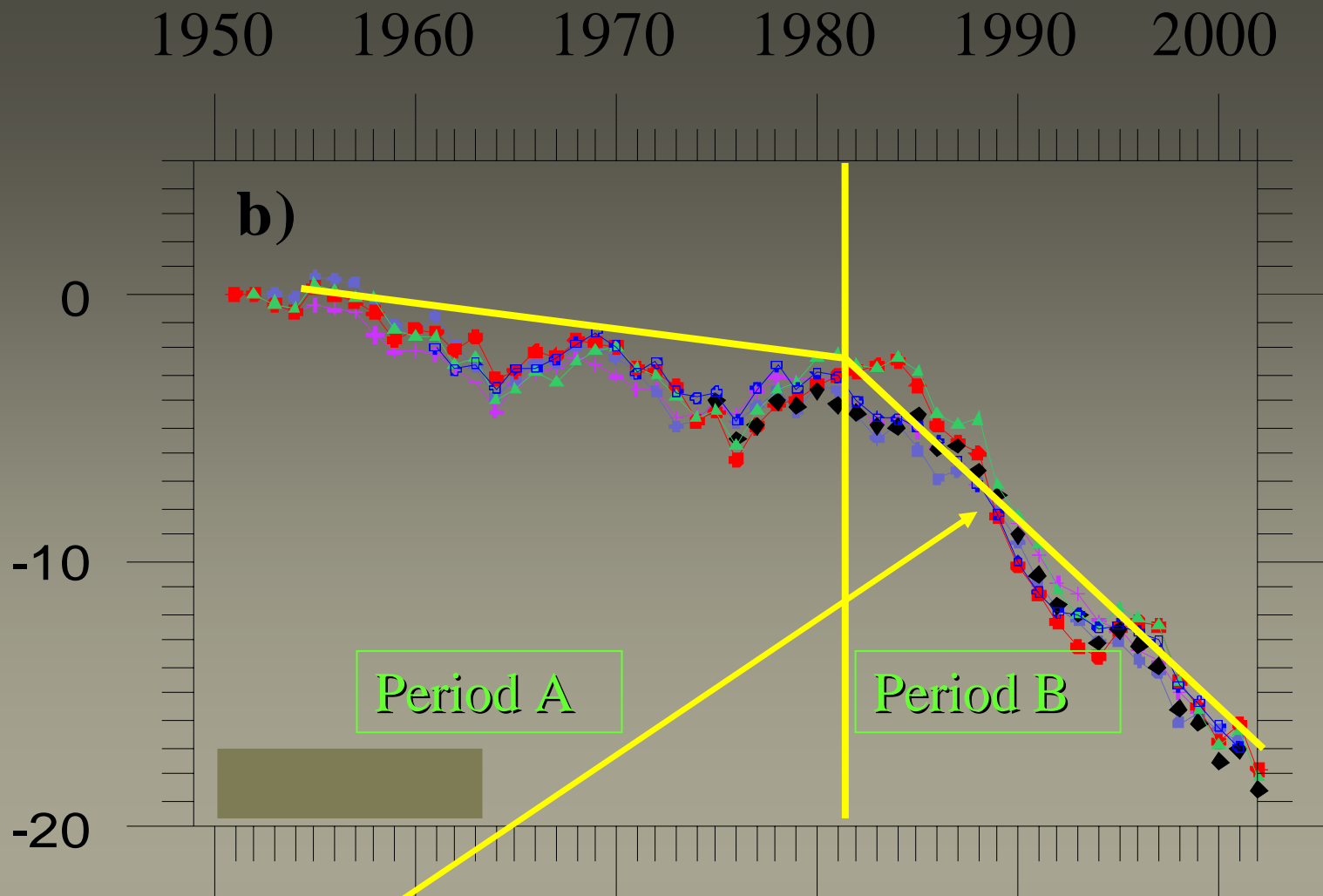
= f (bilan radiatif, chaleur sensible)

$$S\downarrow(1-\alpha) + L\downarrow - L\uparrow \quad \text{Bilan radiatif net}$$

$$+ H + \cancel{LE} \quad \text{Flux de chaleurs sensible et latente}$$

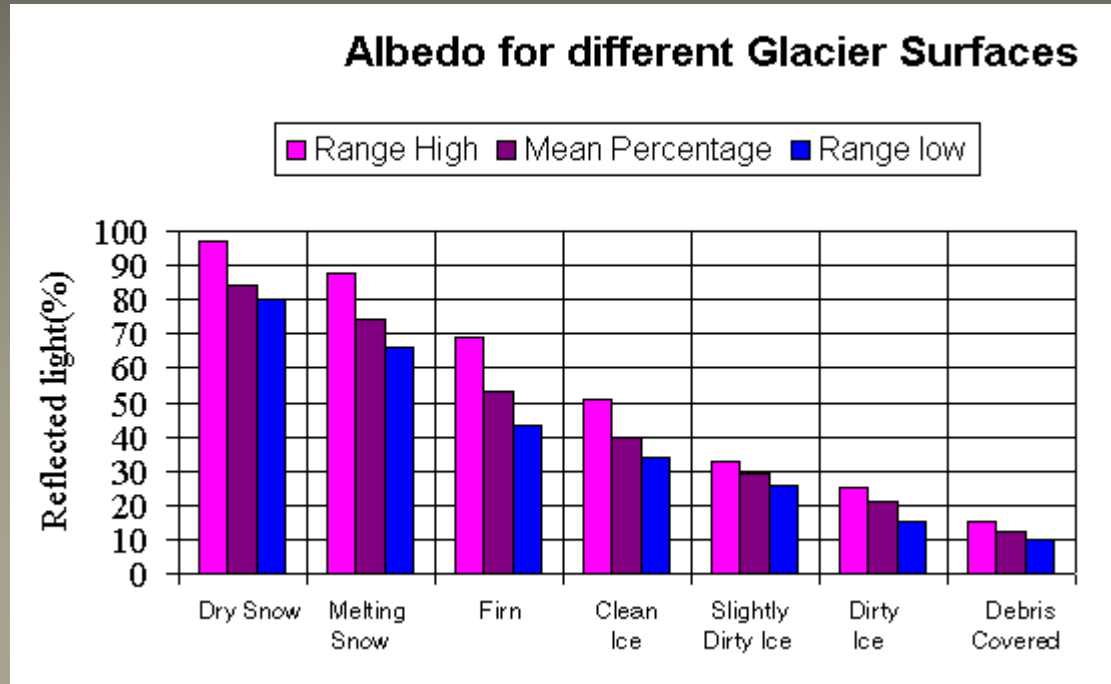
$$= \cancel{\phi} + M.L_f \quad \text{Echauffement et fusion}$$

Cumulative mass balance adjusted
on Saint Sorlin trend (m.w.e.)



Augmentation du bilan d'énergie de surface
de 20 W m^{-2} (juin, juillet, aout)

Très forte variabilité de l'Albédo pour la surface d'un glacier



D'après Paterson, 1994

Le retrait des glaciers alpins



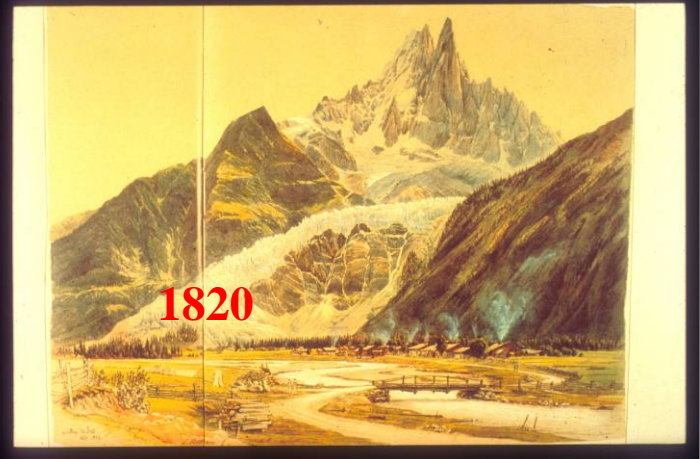
1904

St Sorlin



2001

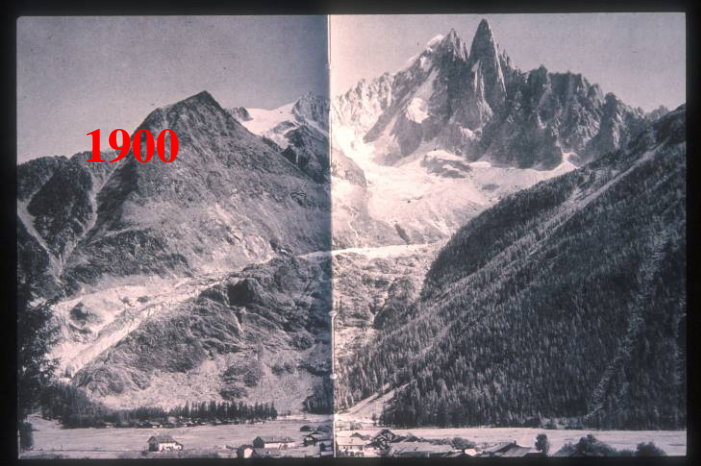
Glacier d'Argentière



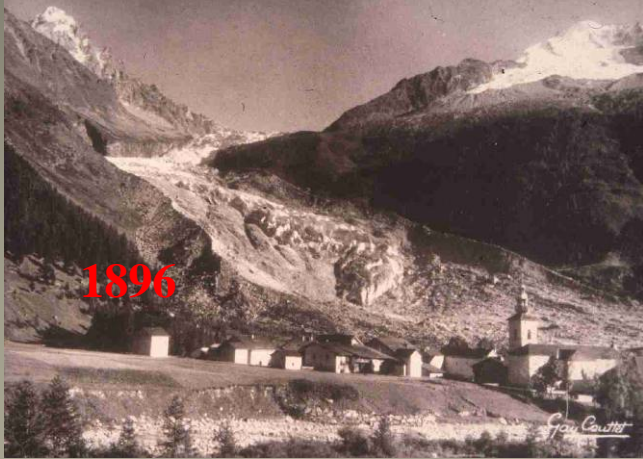
1820



1864



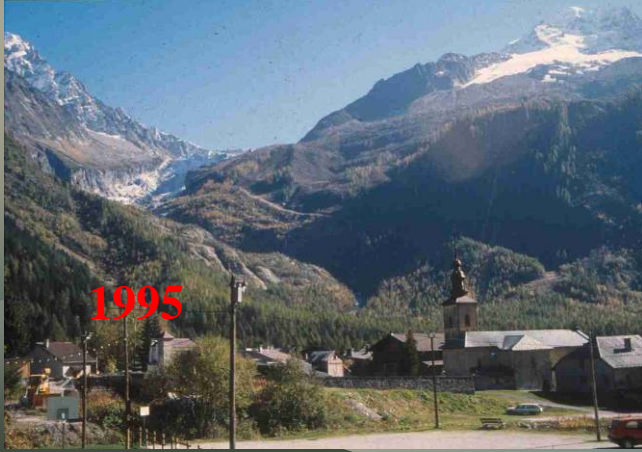
1900



1896



1995



1995

Mer de Glace

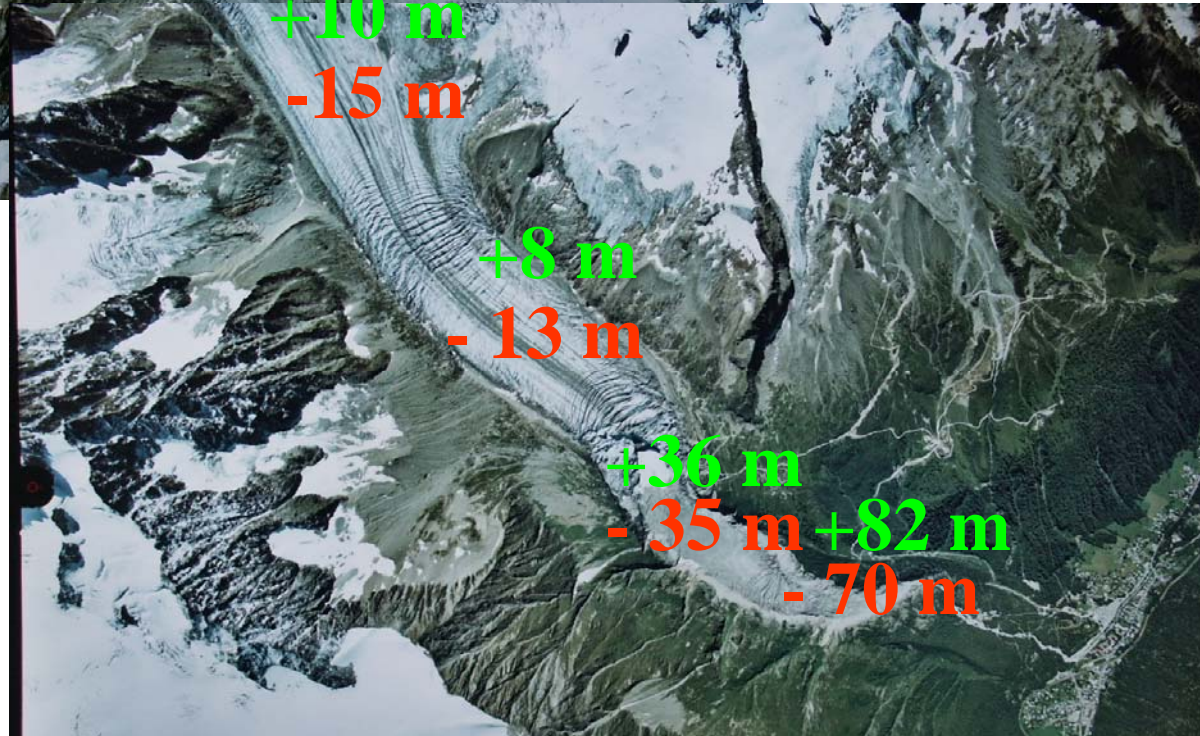
02/12/2007

5330



Mesures LGGE

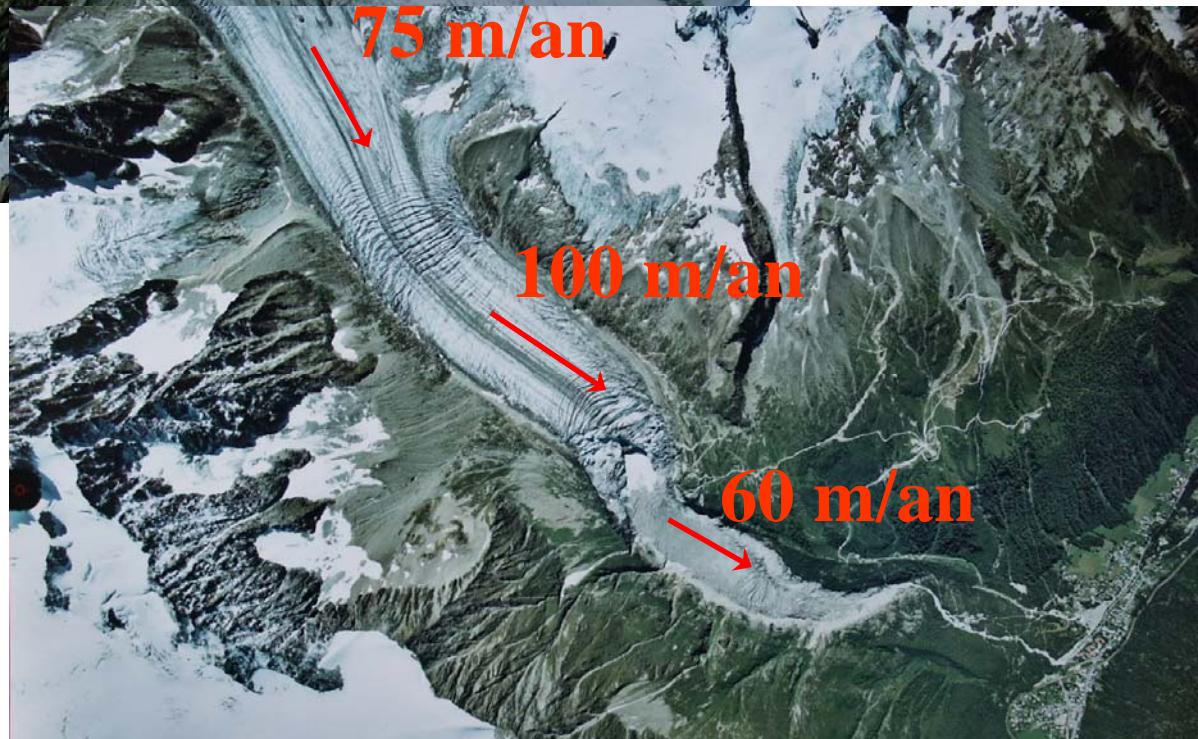
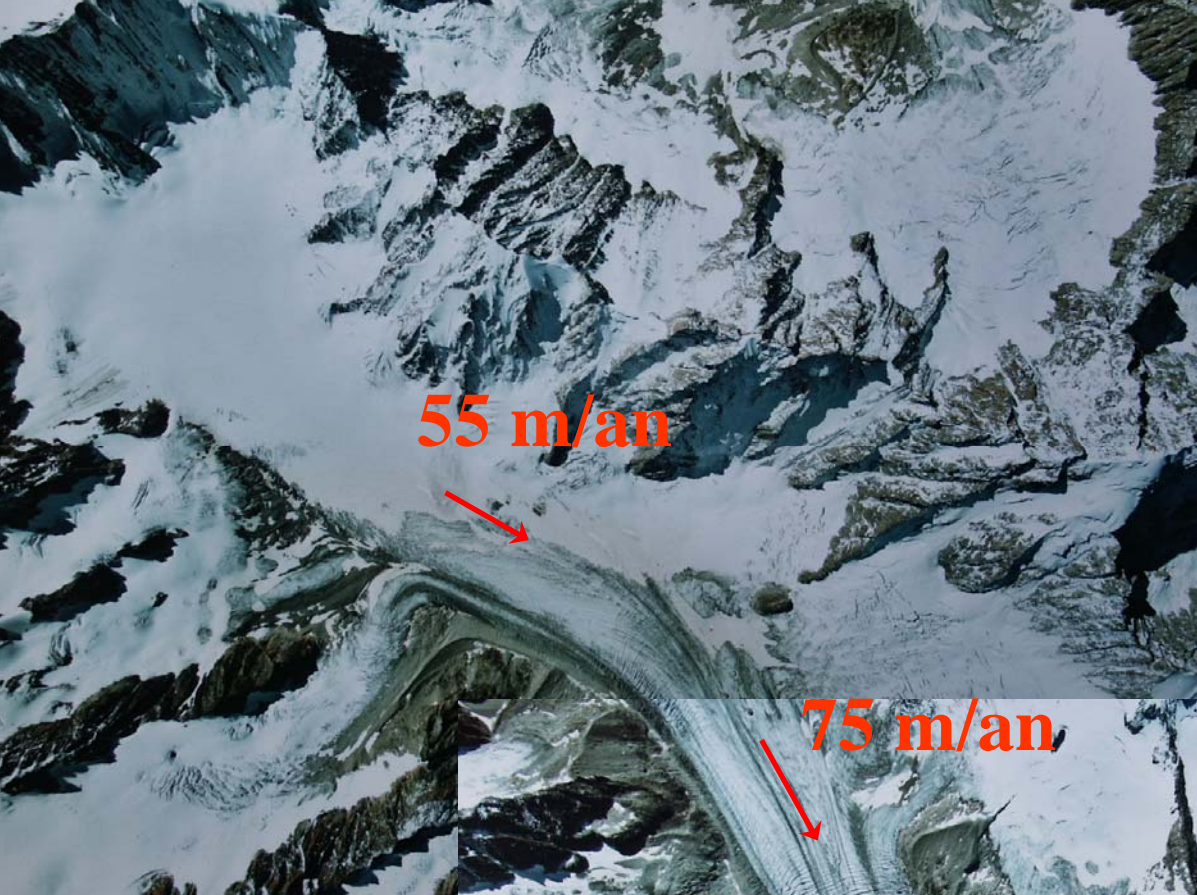
Variations d'épaisseur



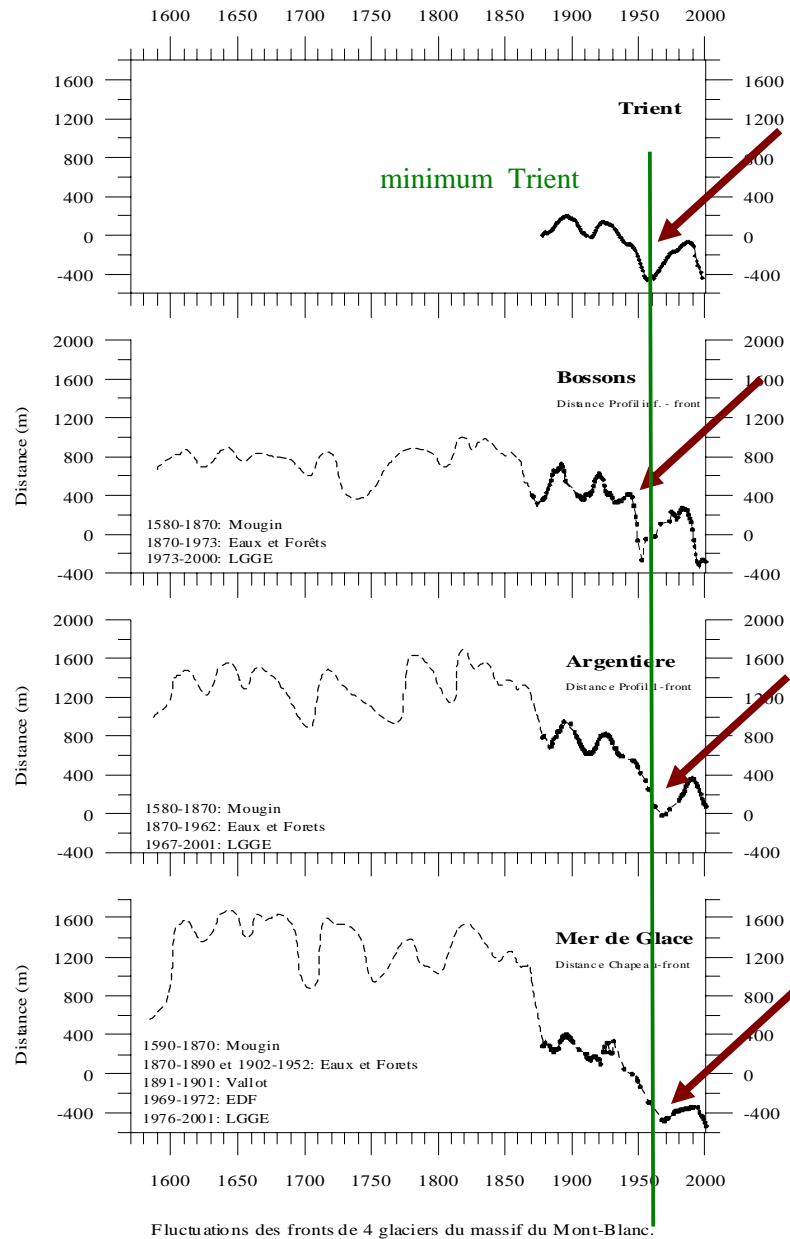
1960-1984

1985-2002

Mesures LGGE
Vitesses de surface



2002



Fluctuations des fronts de 4 glaciers du massif du Mont-Blanc.

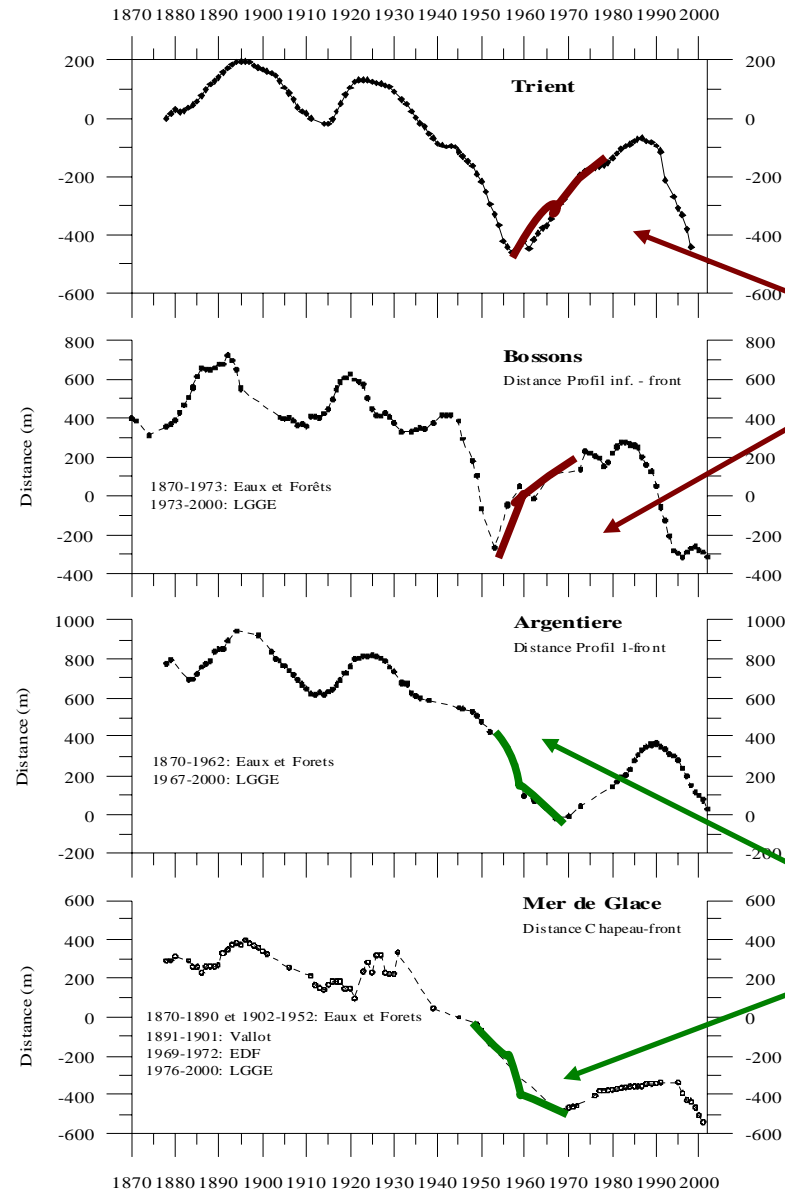


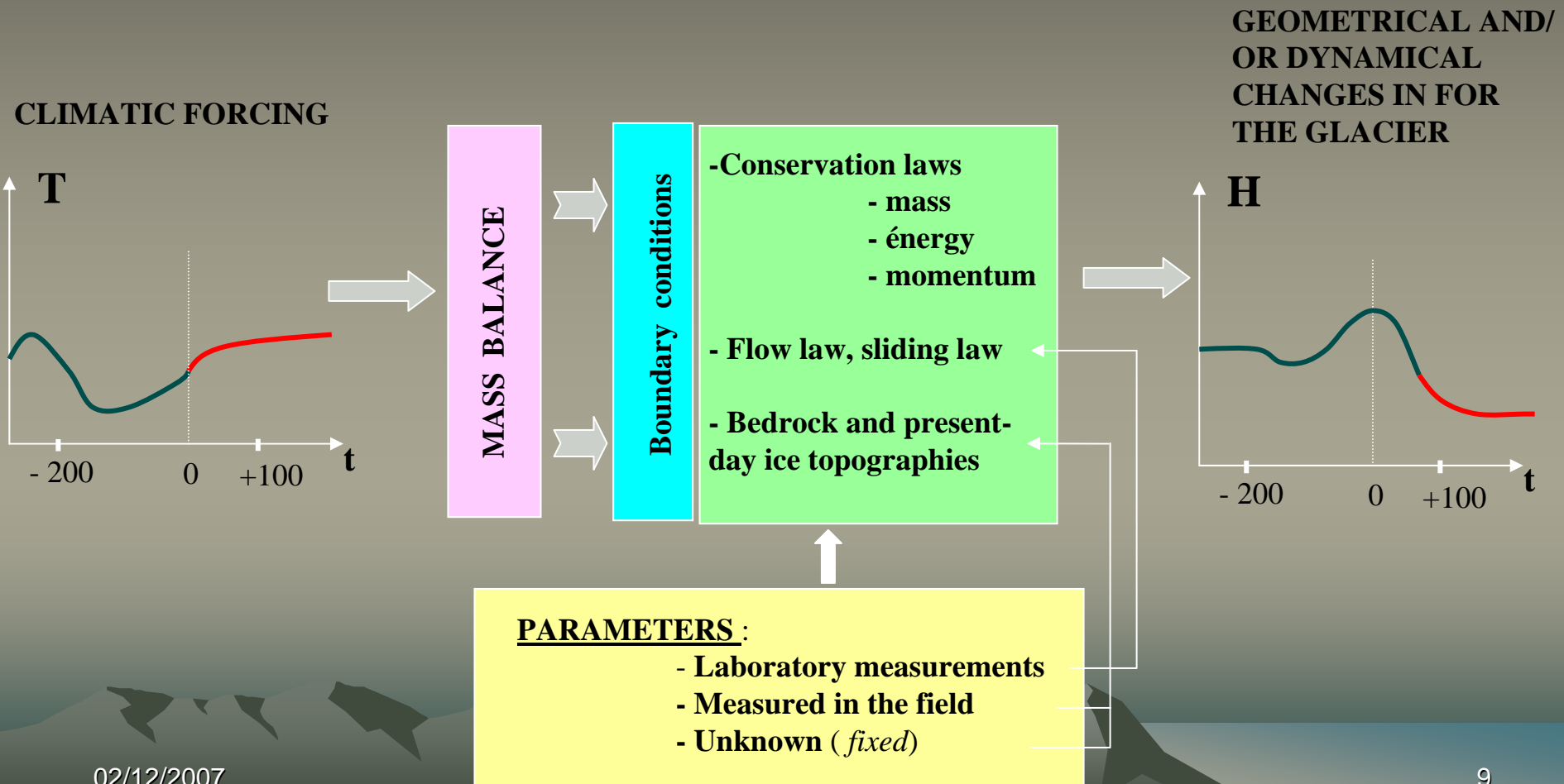
Figure n°15: Fluctuations des fronts de 4 glaciers du massif du Mont-B lanc.

avancée

pas la même façon
de répondre au climat,
pas le même temps
de réponse
l'importance
d'un modèle

retrait

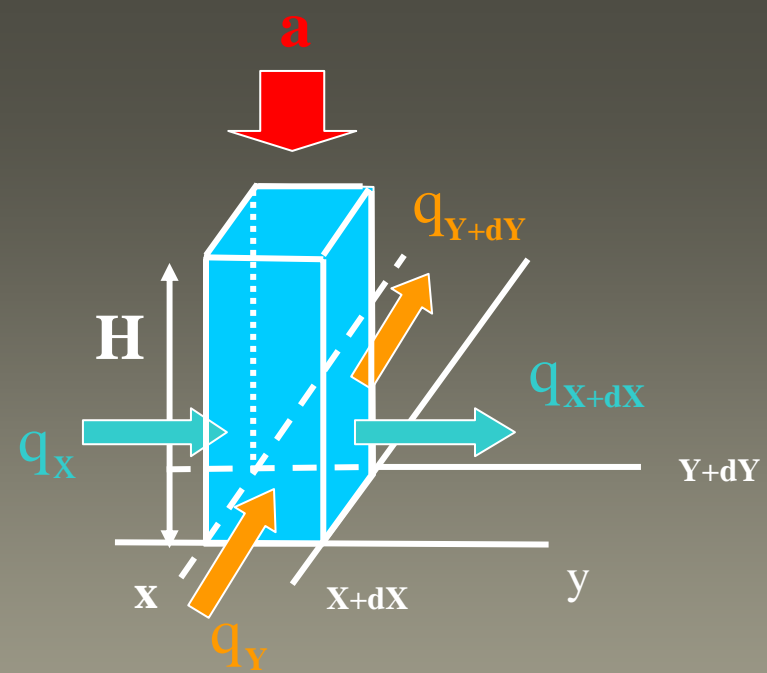
ICE FLOW MODEL



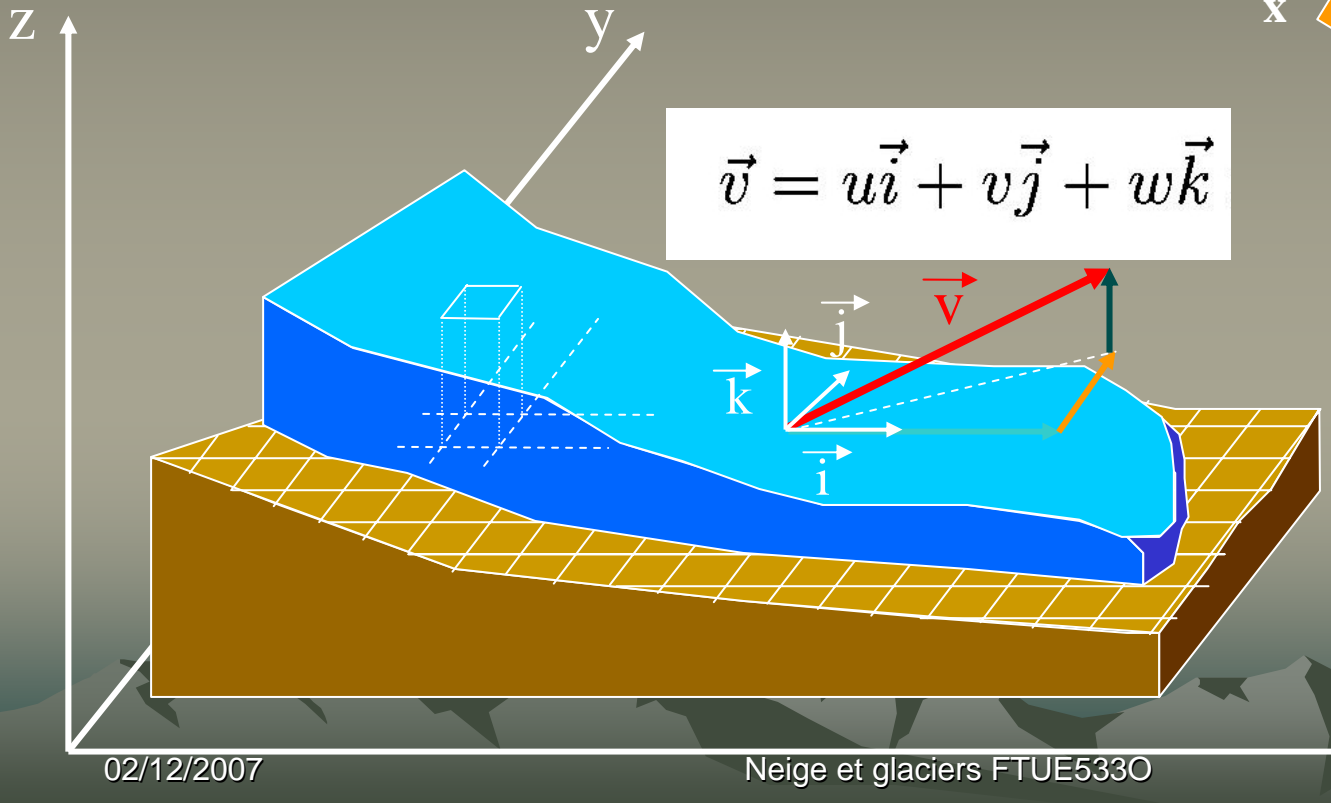
Mass conservation :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a - \nabla \cdot \vec{q},$$

$$q_x = \int_B^S u dz ; \quad q_y = \int_B^S v dz$$



$$\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$$



Creep law :

$$\dot{\epsilon}_{i,j} = A(T^*) \tau_*^2 \tau'_{i,j}$$

Loi de fluage :

$$\dot{\epsilon}_{i,j} = A(T^*) \tau_*^2 \tau'_{i,j}$$

$$\dot{\epsilon}_{x,z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$
$$\dot{\epsilon}_{y,z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

Champ de vitesse en
fonction des contraintes

Equilibre mécanique

$$\frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} = \rho g_i$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a - \frac{\partial(u_b \cdot H)}{\partial x} - \frac{\partial(v_b \cdot H)}{\partial y} + \frac{2A(T^*)(\rho g)^3}{5} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial S}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D \frac{\partial S}{\partial y} \right] \right)$$

Codage aux differences finies

Discrétisation spatiale

- grille à **50 m**.

Intégration numérique selon un schéma semi implicite (ADI)

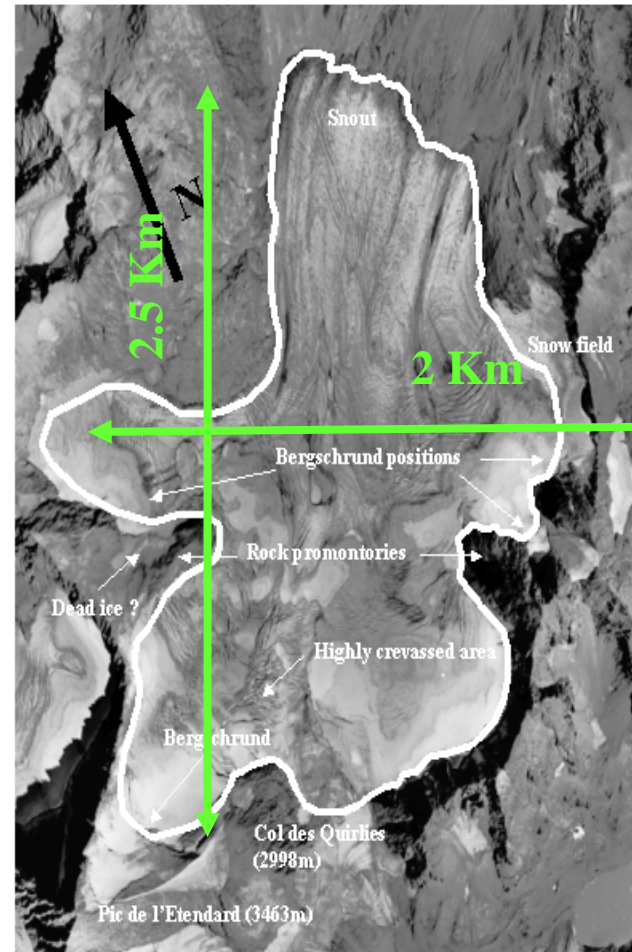
- Intervalle de temps à **0.05 an**

Application au glacier de Saint Sorlin

- Glacier de type cirque
- Epaisseur caractéristique de 100 m

Rapport d'aspect faible ($5 \cdot 10^{-2}$)

Approximation de la couche mince



Données concernant le Glacier de Saint Sorlin

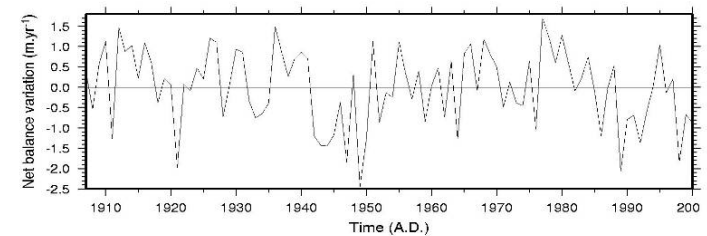
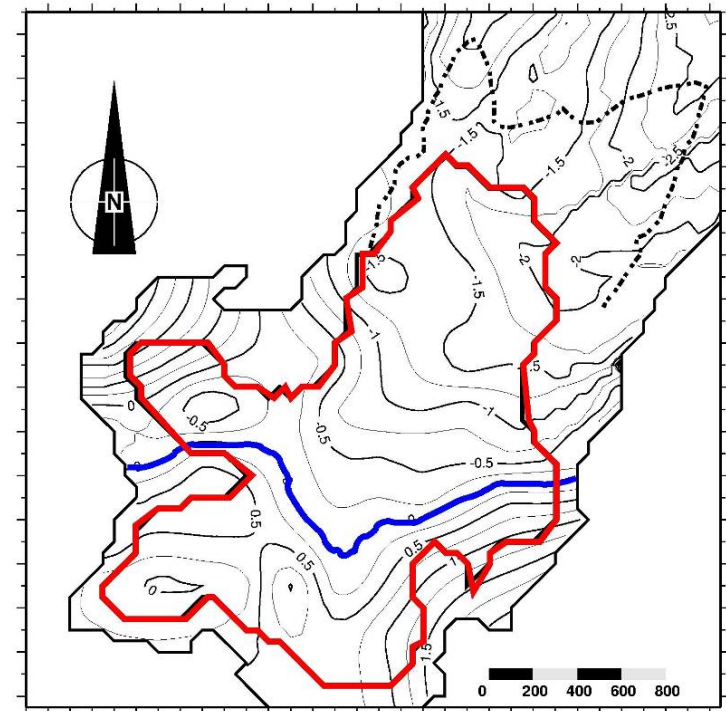
1 ->

Bilan de masse

1 – Forçage du modèle

2 – Données en entrée

3 – Contrainte du modèle



2 ->

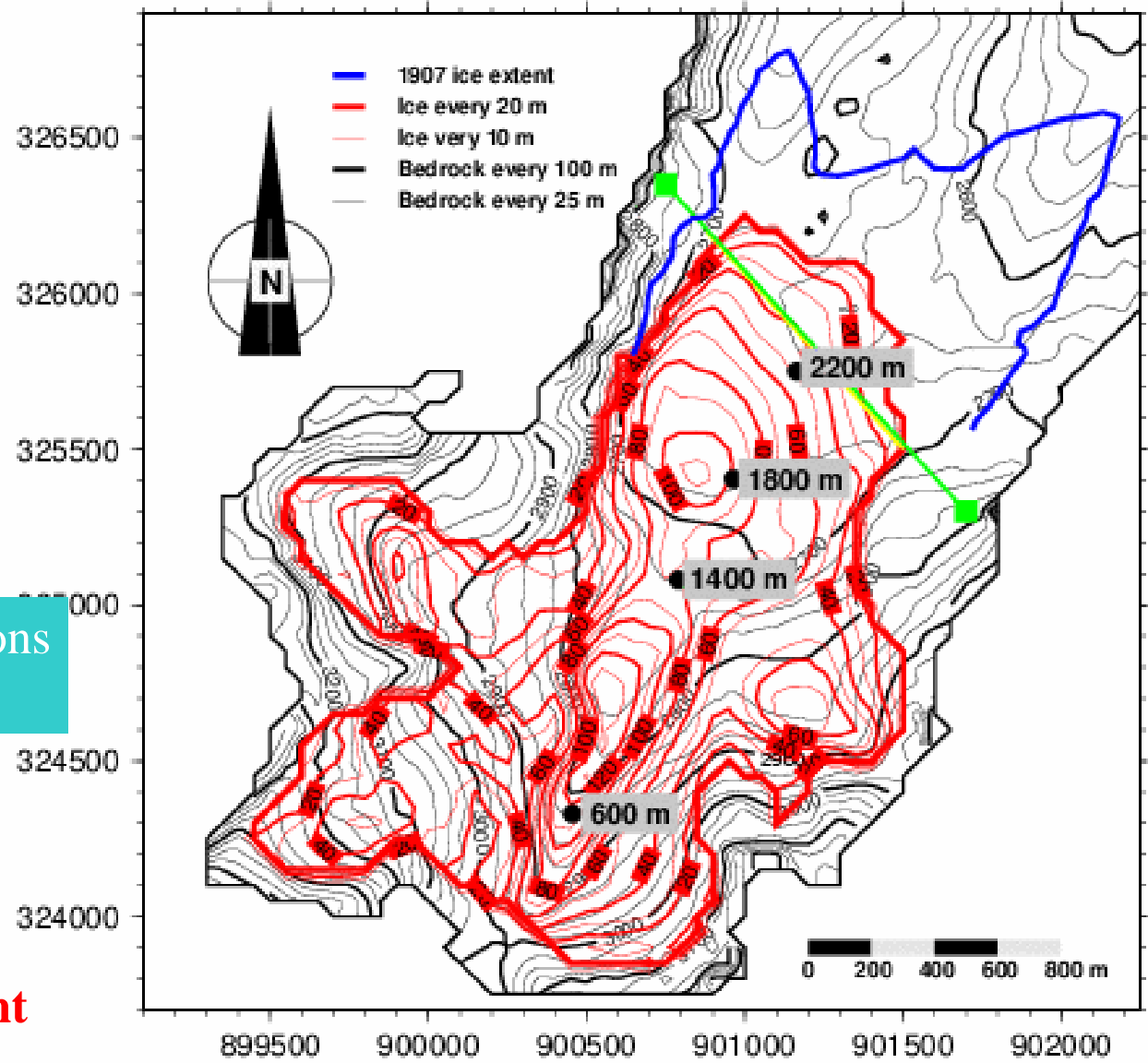
-Topographies
glaciaire et
rocheuse

3 ->

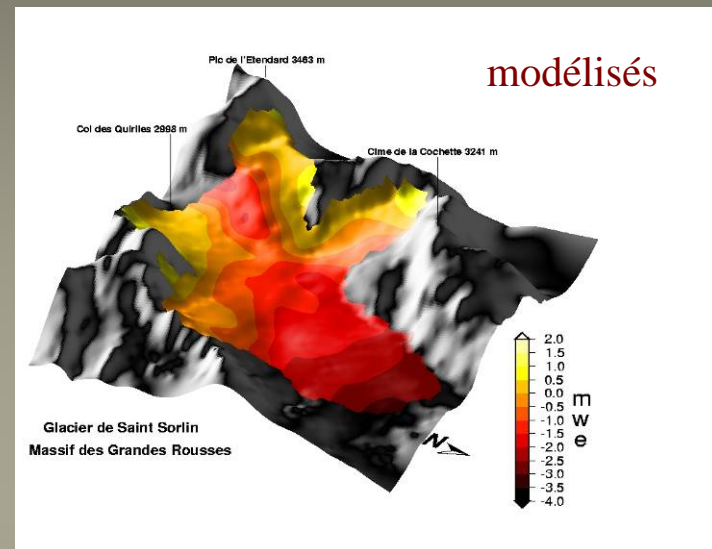
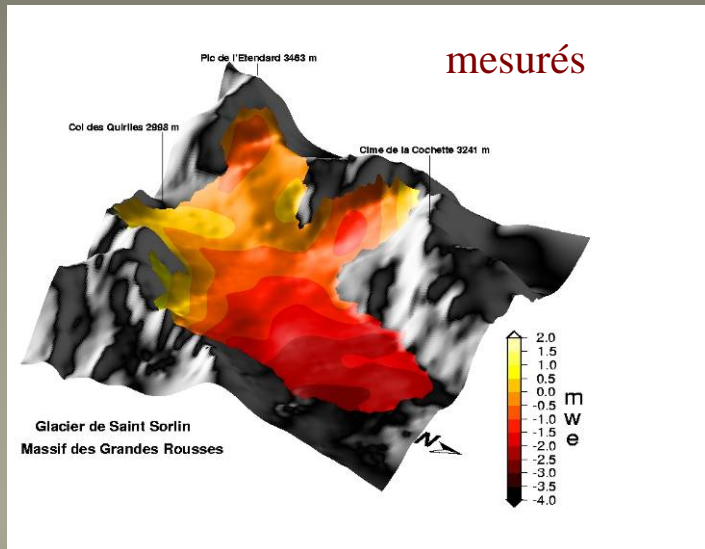
-Anciennes positions
du front

- Moraines anciennes

- Mesures directes du front



1982-2005



Scénario $+3^{\circ}\text{C}$: ligne d'équilibre remonte à 3400 m

